

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Likuifaksi merupakan fenomena geoteknik kritis yang terjadi ketika tanah kehilangan kekuatan geser dan kekakuannya akibat beban gempa bumi, sehingga tanah berperilaku menyerupai cairan (Seed & Idriss, 1971). Ditinjau dari aspek mekanika tanah, fenomena ini diinduksi oleh peningkatan tekanan air pori yang sangat cepat, mengakibatkan penurunan tegangan efektif tanah secara signifikan (Terzaghi, 1948). Kerentanan likuifaksi cenderung terjadi pada endapan muda, khususnya tanah berpasir lepas hasil pengendapan periode kontemporer yang memiliki struktur butiran belum stabil (Seed & Idriss, 1971). Selain aspek waktu pengendapan, ukuran dan distribusi butiran tanah seperti pasir halus dan lanau non-plastis turut memperbesar potensi terjebaknya tekanan air pori karena kemampuan drainase yang rendah (Kramer, 1996).

Dalam menganalisis tingkat potensi likuifaksi secara standar, para praktisi umumnya mengacu pada metode *simplified* yang membandingkan beban siklik akibat gempa *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dengan ketahanan tanah *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) untuk mendapatkan faktor keamanan (Youd & Idriss, 2001). Proses evaluasi tersebut melibatkan integrasi berbagai parameter teknis lapangan, antara lain nilai N-SPT yang terkoreksi $(N1)_{60}$ dari *Standard Penetration Test* (SPT) untuk mengukur kepadatan relatif (Seed et al., 1983), serta input seismik berupa percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA_M atau (a_{max})) (Youd & Idriss, 2001). Meskipun standar analisis telah disusun melalui para peneliti terdahulu, tantangan utama di lapangan adalah tingginya tingkat ketidakpastian data numerik yang sulit diakomodasi oleh logika biner konvensional (Ross, 2005).

Kendala fundamental yang melatarbelakangi studi ini merupakan kebutuhan untuk menyederhanakan data numerik yang lapangan yang samar, khususnya hasil pengujian N-SPT yang terkoreksi $(N1)_{60}$ dan besaran PGA_M atau (a_{max}) dalam satu sistem analisis tunggal yang efisien. Terdapat kebutuhan akan sebuah alat bantu analisis yang mampu menyederhanakan data numerik lapangan yang bersifat samar menjadi informasi tingkat potensi yang lebih objektif. Hal ini diperkuat oleh fakta bahwa penggunaan variabel linguistik dinilai lebih dekat dengan intuisi manusia dibandingkan presisi bilangan semata, sehingga memungkinkan adanya toleransi terhadap ketidakpastian data lapangan (Zadeh, 1965).

Sebagai solusi untuk mempermudah analisis data setelah pengujian lapangan, penelitian ini menerapkan *Fuzzy Logic*. Metodologi ini memungkinkan elemen menjadi anggota suatu himpunan dengan tingkat keanggotaan tertentu antara 0 sampai 1 (Zadeh, 1965). Dengan menggunakan sistem inferensi fuzzy berbasis aturan IF-THEN, pengetahuan pakar geoteknik dapat direpresentasikan ke dalam bahasa mesin secara lebih fleksibel dan adaptif terhadap ketidakpastian (Mamdani & Assilian, 1975). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pendukung keputusan yang mampu memetakan interaksi antara kepadatan tanah relatif dengan menerapkan Fuzzy Logic berdasarkan data N-SPT yang terkoreksi $(N1)_{60}$ dan beban gempa yang direpresentasikan oleh PGA_M atau (a_{max}) ke dalam suatu indeks potensi likuifaksi yang

stabil, konsisten, dan mudah diinterpretasikan. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah pengembangan model evaluasi tingkat potensi likuifaksi yang memiliki stabilitas dan konsistensi tinggi melalui penerapan metode Mamdani dengan hasil defuzzifikasi centroid (Ross, 2005). Dengan mengintegrasikan data dalam kerangka logika fuzzy, penelitian ini memberikan kemudahan bagi praktisi untuk melakukan penilaian potensi yang lebih akurat, yang pada akhirnya mendukung efektivitas mitigasi bencana dan perencanaan infrastruktur di wilayah rawan gempa. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, maka dilakukan penelitian ini dengan judul: **“Analisis Tingkat Risiko Potensi Likuifaksi Menggunakan Fuzzy Logic Berdasarkan Data Standard Penetration Test (SPT)”**

1.1.1 Rumusan Masalah

Permasalahan yang ingin diselesaikan, berdasarkan uraian diatas, dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil analisis risiko potensi likuifaksi (*Liquefaction Potential Index* (LPI)) dengan menggunakan metode *simplified*?
2. Bagaimana analisis tingkat risiko potensi likuifaksi dengan menggunakan analisis fuzzy logic?

1.1.2 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis risiko potensi likuifaksi dengan menggunakan metode *simplified*.
2. Membangun sistem inferensi *fuzzy* dengan metode Mamdani untuk menganalisis tingkat risiko potensi likuifaksi.

1.1.3 Manfaat Penelitian

1. Berkontribusi dalam pengembangan pengaplikasian kecerdasan buatan di bidang geoteknik melalui penerapan *fuzzy logic* untuk memodelkan ketidakpastian data pada analisis risiko potensi likuifaksi.
2. Menyediakan alat bantu analisis risiko potensi terjadinya likuifaksi yang objektif bagi praktisi untuk mendukung efisiensi dalam perencanaan mitigasi bencana dan perancangan infrastruktur.

1.1.4 Batasan Masalah

Penulisan skripsi ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Analisis menggunakan data primer yang terdiri dari data N-SPT lapangan, jenis tanah, kedalaman lapisan tanah dan koordinat titik uji serta nilai percepatan tanah puncak terpetakan (PGA) pada daerah Untia, Kota Makassar, Sulawesi Selatan.
2. Pengembangan model menggunakan metode Mamdani pada *Fuzzy Inference System* (FIS) untuk mengolah variabel *input* nilai $(N1)_{60}$, PGA_M atau (a_{max}) , dan *Safety Factor* (SF) menjadi *output* berupa nilai *Liquefaction Potential Index* (LPI).
3. Model fuzzy logic berfungsi sebagai alat bantu klasifikasi tingkat potensi, bukan untuk menggantikan prosedur perhitungan geoteknik standar.

4. Hasil analisis disajikan sebagai informasi tingkat risiko potensi (dampak) likuifaksi yang digunakan sebagai masukan pada tahap perencanaan dan pengelolaan proyek konstruksi.
5. Penelitian ini berfokus pada analisis tingkat risiko potensi (dampak) likuifaksi, untuk probabilitas kejadian tidak ditinjau lebih lanjut akibat keterbatasan ketersediaan data statistik historis secara spesifik pada titik uji.

1.2 Teori

1.2.1 Manajemen Risiko

Risiko merupakan peristiwa atau kondisi tidak pasti yang apabila terjadi, akan memberikan dampak positif maupun negatif terhadap satu atau lebih tujuan proyek. Berkaitan dengan hal tersebut, manajemen risiko secara keseluruhan bertujuan untuk menjaga paparan risiko dalam kisaran yang dapat diterima melalui strategi yang meliputi pengurangan pendorongan ancaman, peningkatan pendorong peluang, serta memaksimalkan probabilitas pencapaian tujuan secara keseluruhan (*Project Management Institute*, 2021).

Tujuan analisis risiko adalah untuk memahami sifat risiko dan karakteristiknya, termasuk tingkat risiko, melalui pertimbangan rinci mengenai ketidakpastian, sumber risiko, konsekuensi, kemungkinan, peristiwa, skenario, pengendalian, serta efektivitasnya (ISO 31000:2018). Berdasarkan pertimbangan tersebut, risiko secara matematis dapat didefinisikan sebagai hasil interaksi antara probabilitas dan dampak sebagai berikut (Zhi, 1995):

$$R = P \times I \quad (1)$$

dimana:

R = Tingkat atau nilai risiko

P = Probabilitas terjadinya risiko

I = Tingkat dampak risiko

1.2.2 Likuifaksi

Likuifaksi merupakan fenomena teknis di mana stabilitas lapisan tanah menghilang secara cepat akibat adanya lonjakan tekanan air pori yang dipicu oleh beban siklik, baik yang berasal dari getaran gempa bumi maupun pembebanan dinamis cepat lainnya. Kondisi ini secara spesifik terjadi pada tanah yang berada dalam keadaan jenuh air, di mana seluruh ruang kosong atau rongga di antara butiran tanah terisi penuh oleh air. Secara mekanis, sebelum terjadi guncangan, tekanan air dalam tanah cenderung stabil dan rendah, namun getaran hebat memaksa air tersebut memberikan tekanan balik yang kuat terhadap partikel-partikel tanah. Akibatnya, ikatan antar butir menjadi renggang dan kepadatan tanah menurun drastis, yang pada akhirnya mengubah sifat fisik tanah dari padat menjadi menyerupai fluida atau cairan kental (Mario, 2019).

Transformasi tanah menjadi serupa cairan ini berdampak fatal terhadap kapasitas daya dukung lahan terhadap beban di atasnya. Ketika tanah kehilangan kekakuannya, struktur bangunan yang berada di permukaan maupun yang tertanam di dalamnya tidak lagi memiliki tumpuan yang kokoh, sehingga risiko kegagalan struktur atau ambblasnya bangunan menjadi tidak terelakkan (Mario, 2019).

Menurut Kramer (1996), fenomena terkait likuifaksi dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama berdasarkan respons tanah jenuh non-kohefif terhadap pembebanan cepat atau siklik dalam kondisi tidak terdrainase: likuifaksi aliran (*flow liquefaction*) dan mobilitas siklik (*cyclic mobility*). Kedua jenis fenomena ini sangat penting untuk dievaluasi dalam penilaian bahaya seismik karena dapat menyebabkan kerusakan signifikan. Meskipun mobilitas siklik terjadi lebih sering dan dalam rentang kondisi lokasi yang lebih luas, efek yang ditimbulkan oleh likuifaksi aliran cenderung jauh lebih parah dan dramatis.

Likuifaksi aliran merupakan kondisi ketidakstabilan tanah yang paling merusak, sering kali berujung pada kegagalan aliran (*flow failures*). Fenomena ini terjadi ketika tegangan geser statis yang bekerja pada suatu massa tanah yang dibutuhkan untuk menjaga keseimbangan lereng lebih besar daripada kekuatan geser tanah dalam kondisi cairnya. Tegangan siklik akibat gempa berfungsi sebagai pemicu yang menurunkan kekuatan tanah hingga mencapai kondisi tidak stabil. Setelah terpicu, deformasi besar terjadi secara cepat dan didorong oleh tegangan geser statis, menyebabkan material tanah bergerak dalam jarak yang jauh seolah-olah seperti cairan, seperti yang terlihat pada kegagalan bendungan di masa lalu.

Sebaliknya, mobilitas siklik terjadi ketika tegangan geser statis lebih kecil daripada kekuatan geser tanah yang terlikuifaksi. Deformasi permanen yang dihasilkan berkembang secara bertahap selama guncangan gempa akibat kombinasi tegangan geser siklik dan statis. Bentuk paling umum dari kegagalan mobilitas siklik adalah penyebaran lateral (*lateral spreading*) pada lereng yang sangat landai atau di dekat badan air. Kasus khusus terjadi pada tanah datar (*level-ground liquefaction*), di mana tidak ada tegangan geser statis horizontal yang signifikan. Kondisi ini menyebabkan gerakan kacau (*ground oscillation*) selama gempa, diikuti oleh penurunan vertikal yang berlebihan dan munculnya sand boils setelah gempa berhenti, sebagai akibat dari hilangnya tekanan pori berlebih.

1.2.3 Analisis Risiko Potensi Likuifaksi

Analisis potensi likuifaksi pada dasarnya dilakukan dengan membandingkan antara kapasitas ketahanan tanah terhadap beban getaran gempa yang terjadi. Secara teknis, analisis ini menggunakan pendekatan tegangan siklik (*Simplified Procedure*) yang melibatkan dua komponen utama: beban gempa yang dinyatakan sebagai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan kekuatan tanah yang dinyatakan sebagai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR). Untuk memperoleh nilai-nilai tersebut secara akurat, diperlukan parameter *input* yang merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Parameter tersebut meliputi data ketahanan tanah dari pengujian *Standard Penetration Test* (SPT), serta besaran beban seismik yang dipicu oleh *Peak Ground Acceleration* (PGA). Integrasi dari kedua parameter ini nantinya akan menghasilkan nilai Faktor Keamanan (*Safety Factor*) dan Indeks Potensi Likuifaksi (*Liquefaction Potential Index*) yang menjadi dasar dalam penilaian potensi.

1.2.3.1 Analisis Nilai N-SPT Terkoreksi

Pengujian lapangan yang digunakan untuk merepresentasikan kapasitas perlawanan tanah dalam penelitian ini *Standard Penetration Test* (SPT). Prosedur penentuan kapasitas perlawanan tanah berdasarkan data SPT dilakukan dengan

mengonversi nilai penetrasi lapangan menjadi nilai N-SPT terkoreksi. Merujuk pada metode *Simplified Procedure* oleh Youd dan Idriss (2001), penentuan nilai dilakukan menggunakan sejumlah faktor koreksi sebagaimana dinyatakan dalam rumus berikut:

$$(N1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad (2)$$

dimana:

$(N1)_{60}$ = N-SPT terkoreksi

N_m = N-SPT yang diperoleh dari hasil uji lapangan

C_N = faktor koreksi N-SPT lapangan terhadap tekanan overburden efektif

C_E = faktor koreksi rasio energi palu

C_B = faktor koreksi diameter lubang bor

C_R = faktor koreksi panjang bentang

C_S = faktor koreksi sampel

Untuk memperoleh nilai N-SPT yang telah terkoreksi terhadap beban overburden, maka digunakan faktor koreksi yang dihitung dengan formulasi sebagai berikut:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,5} \quad (3)$$

dimana:

C_N = faktor koreksi N-SPT lapangan terhadap tekanan overburden efektif

P_a = tekanan atmosfer (100 kPa)

σ'_{vo} = tegangan overburden vertikal efektif (kPa)

Robertson dan Wride (1998) menjelaskan nilai faktor koreksi dari SPT yang dimodifikasi dari Skempton pada **Tabel 1** sebagai berikut:

Tabel 1. Faktor Koreksi N-SPT

Faktor	Variabel Alat	Simbol	Koreksi
Tegangan Total	-	C_N	$\left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0,5}$
	-	C_N	$C_N \leq 1,7$
Rasio Energi	<i>Hammer Donat</i>	C_E	0,5 – 1,0
	<i>Safety Hammer</i>	C_E	0,7 – 1,2
	<i>Automatic Hammer</i>	C_E	0,8 – 1,3
Diameter Lubang	65 – 115 mm	C_B	1
	150 mm	C_B	1,05
	200 mm	C_B	1,15
Panjang Rod	< 3 m	C_R	0,75
	3 – 4 m	C_R	0,8
	4 – 6m	C_R	0,85
	6 – 10 m	C_R	0,95
	10 – 30 m	C_R	1,0
Metoda Sampling	Sampler Standar	C_S	1,0

	Sampler Tanpa <i>Liner</i>	C _s	1,1 – 1,3
--	-------------------------------	----------------	-----------

Sumber: Yould dan Idriss, 2001

Setelah mendapatkan nilai N-SPT terkoreksi kemudian dikonversikan untuk mengetahui kepadatan relatif tanah. Berdasarkan Terzaghi et al. (1996), kategori kepadatan relatif tanah ditentukan berdasarkan rentang nilai $(N1)_{60}$ sebagai berikut:

Tabel 2. Korelasi N-SPT Terkoreksi $((N1)_{60})$ terhadap Kepadatan Relatif Tanah

Jumlah Pukulan $(N1)_{60}$	Kepadatan Relatif Tanah
0 - 4	Sangat Lepas
4 - 10	Lepas
10 - 30	Sedang
30 - 50	Padat
>50	Sangat Padat

Sumber: Terzaghi et al., 1996

Penentuan faktor koreksi N-SPT lapangan terhadap tekanan overburden efektif (CN) memerlukan nilai tegangan overburden vertikal efektif (σ'_{vo}). Nilai ini diperoleh melalui analisis korelasi antara nilai tegangan vertikal total (σ_{vo}), berat volume tanah efektif (γ_{sat}) dan jenuh (γ'), serta nilai tekanan air pori (u) dengan tahapan sebagai berikut (Terzaghi, 1943):

$$u = \gamma_w \cdot z \quad (4)$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (5)$$

$$\sigma_{vo} = \gamma_{sat} \cdot z \quad (6)$$

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - u \quad (7)$$

dimana:

σ'_{vo}	= tegangan overburden vertikal efektif (kN/m ³ atau kPa)
σ_{vo}	= tegangan vertikal total (kN/m ³ atau kPa)
γ_{sat}	= berat volume jenuh
γ'	= berat volume efektif
γ_w	= berat isi air (9,81 kN/m ³)
u	= tekanan air pori (kN/m ²)
z	= kedalaman lapisan tanah (m)

Tabel 3. Interpolasi N-SPT dengan Berat Volume Jenuh Tanah (γ_{sat})

Jumlah Pukulan N-SPT	Berat Volume Jenuh (γ_{sat})
-------------------------	--

0 - 4	16 - 18
4 - 10	18 - 19
10 - 30	19 - 20
30 - 50	20-21

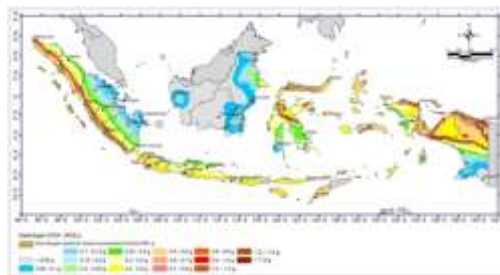
Sumber: Bowles, 1996

Hubungan nilai CRR dengan nilai SPT yang telah dikoreksi dan gempa bumi dengan magnitude $M = 7,5$ dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34 - (N1)_{60}} + \frac{(N1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (8)$$

1.2.3.2 Analisis Percepatan Gempa

Percepatan gempa di permukaan tanah atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) merupakan parameter utama yang merepresentasikan besarnya beban dinamik yang diterima oleh massa tanah saat terjadi gempa bumi. Penentuan nilai percepatan permukaan ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis yang mengacu pada standar SNI 1726:2019. Adapun peta gempa yang dipertimbangkan rata-rata geometrik (MCE_G) wilayah Indonesia pada **Gambar 1** berikut.



Gambar 1. Rentang Nilai PGA Wilayah Indonesia

Sumber: SNI-1726:2019

Sesuai dengan regulasi SNI 1726:2019 dijelaskan bahwa analisis kerentanan likuifaksi harus dilakukan dengan mengacu pada nilai percepatan puncak di permukaan tanah (PGA), magnitudo momen, serta karakteristik sumber seismik yang sesuai dengan kriteria Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan (MCE_G). Rumus untuk mencari percepatan tanah sesuai dengan pengaruh klasifikasi situs tertera pada rumus berikut:

$$PGA_M (a_{max}) = F_{PGA} \cdot PGA \quad (9)$$

dimana:

$PGA_M / (a_{max})$ = MCE_G percepatan tanah yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs

F_{PGA} = koefisien situs (**Tabel 5**)

PGA = percepatan tanah puncak terpetakan

Selain digunakan dalam perhitungan teknis, nilai PGA_M atau (a_{max}) dikorelasikan dengan tingkat dampak guncangan yang dirasakan di permukaan berdasarkan standar nasional yang ditetapkan oleh Badan Meterologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Hal ini bertujuan untuk memberikan gambaran fungsional mengenai besarnya potensi kerusakan akibat guncangan gempa. Adapun klasifikasi Skala Intensitas Gempa (SIG) tersebut pada **Tabel 4** sebagai berikut:

Tabel 4. Ukuran Kekuatan Gempa Berdasarkan Skala Intensitas Gempabumi BMKG (SIG-BMKG)

Skala SIG BMKG	Warna	Deskripsi Sederhana	Deskripsi Rinci	Skala MMI	PGA
I	Putih	Tidak dirasakan (<i>Not Felt</i>)	Tidak dirasakan atau diraskan hanya oleh beberapa orang tetapi terekam oleh alat.	I-II	<2,9
II	Hijau	Dirasakan (<i>Felt</i>)	Dirasakan oleh orang banyak tetapi tidak menimbulkan kerusakan. Benda-benda ringan yang digantung bergoyang dan jendela kaca bergetar.	III-V	2,9-99
III	Kuning	Kerusakan Ringan (<i>Slight Damage</i>)	Bagian non struktur bangunan mengalami kerusakan ringan, seperti retak rambut pada dinding, atap bergeser ke bawah dan sebagian berjatuhan.	VI	89-167
IV	Jingga	Kerusakan Sedang (<i>Moderate Damage</i>)	Banyak retakan terjadi pada dinding bangunan sederhana, sebagian roboh, kaca pecah. Sebagian plester dinding lepas.	VII-VIII	168-564

			Hampir sebagian besar atap bergeser ke bawah atau jatuh. Struktur bangunan mengalami kerusakan ringan sampai sedang.		
V	Merah	Kerusakan Berat (<i>Heavy Damage</i>)	Sebagian besar dinding bangunan permanen roboh. Struktur bangunan mengalami kerusakan berat. Rel kereta api melengkung.	IX-XII	>564

Sumber: Skala Intensitas Gempabumi – BMKG

<https://share.google/Jq07jdCfAICWYBJv6>

Berdasarkan sifat-sifat tanah pada situs, maka diklasifikasikan sebagai kelas situs SA, SB, SC, SD, SE, atau SF. Adapun koefisien situs ini mengacu pada SNI- 1726 Tahun 2019. Koefisien situs dapat dilihat pada **Tabel 5** dan kelas situs pada **Tabel 6** merupakan jenis tanah, yang dijelaskan sebagai berikut:

Tabel 5. Koefisien Situs F_{PGA}

Kelas Situs	$PGA \leq 0,1$	$PGA = 0,2$	$PGA = 0,3$	$PGA = 0,4$	$PGA = 0,5$	$PGA \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1
SE	2,4	1,9	1,6		1,2	1,1
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI-1726:2019

Berdasarkan SNI 1726:2019, penentuan klasifikasi situs tanah pada dasarnya dapat dievaluasi melalui tiga parameter utama yaitu nilai rata-rata kecepatan gelombang geser ($\bar{V}_s$), nilai rata-rata tahanan penetrasi standar lapangan ($\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$), serta nilai rata-rata kuat geser niralir ($\bar{s}_u$). Namun, mengingat ketersediaan data primer dalam penelitian ini bersumber dari pengujian SPT, maka klasifikasi situs akan menggunakan evaluasi nilai tahanan penetrasi standar lapangan rata-rata ($\bar{N}$) dengan rumus sebagai berikut:

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n di}{\sum_{i=1}^n \bar{N}_i} \quad (10)$$

Tabel 6. Penjelasan Kelas Situs

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{s}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan bantuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar Air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir $\bar{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3m$)		

Sumber: SNI-1726:2019

1.2.3.3 Analisis Tegangan Siklik

Penilaian potensi likuifaksi didasarkan pada perbandingan antara beban dinamik yang bekerja saat gempa bumi dengan kapasitas perlawanan tanah itu sendiri. Dalam metode yang dikembangkan oleh Seed & Idriss (1971), beban luar akibat guncangan direpresentasikan melalui parameter CSR (*Cyclic Stress Ratio*), sedangkan kemampuan tanah untuk menahan beban tersebut dinyatakan dalam CRR (*Cyclic Resistance Ratio*). Analisis terhadap kedua variabel ini menjadi dasar utama dalam menentukan tingkat keamanan suatu lapisan tanah terhadap potensi pencairan. Secara umum, analisis ini memerlukan input data lapangan seperti nilai penetrasi standar (SPT), uji sondir (CPT), kecepatan gelombang geser (V_s), maupun Becker Penetration Test (BPT). Namun, dalam penelitian ini, evaluasi dibatasi pada penggunaan data SPT untuk menentukan nilai CRR, serta penggunaan nilai percepatan tanah puncak (PGA) sebagai parameter utama dalam perhitungan CSR. Perbandingan antara kapasitas ketahanan (CRR) dan beban gempa (CSR) inilah yang nantinya akan menghasilkan angka faktor keamanan (SF) untuk menentukan tingkat potensi likuifaksi.

1. Cyclic Stress Ratio (CSR)

Pendekatan yang dikembangkan oleh Seed & Idriss (1971) berfokus pada komparasi antara rasio tegangan siklik akibat beban gempa (CSR) terhadap kapasitas ketahanan siklik tanah (CRR). Besarnya beban gempa yang direpresentasikan melalui nilai CSR tersebut dapat diestimasi dengan menggunakan rumus berikut:

$$CSR = \frac{\tau_{\max}}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot r_d \quad (11)$$

dimana:

CSR	= tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi
$\tau_{\max}$	= tegangan geser siklik
σ_{vo}	= tegangan overburden vertikal total (t/m^2)
σ'_{vo}	= tegangan overburden vertikal efektif (t/m^2)
$a_{\max}$	= percepatan permukaan tanah maksimum arah horizontal (m/s^2)
r_d	= koefisien reduksi kedalaman
g	= percepatan gravitasi ($9,8 m/s^2$)

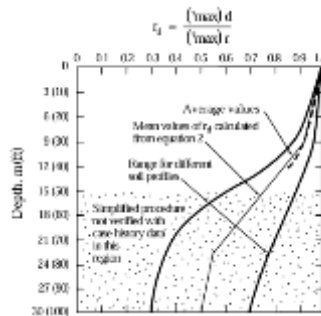
Dalam mengestimasi reduksi tegangan, Whitman (1971) merumuskan sebuah metode perhitungan koefisien reduksi. Nilai koefisien tersebut dapat ditentukan menggunakan rumus-rumus atau melalui pendekatan grafis yang menghubungkan koefisien reduksi dengan kedalaman seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**.

$$r_d = 1,0 - 0,00765z \quad \text{untuk } z \leq 9,15 \text{ m} \quad (12)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267z \quad \text{untuk } 9,15 \leq 23 \text{ m} \quad (13)$$

$$r_d = 0,774 - 0,008z \quad \text{untuk } 23 \leq 30 \text{ m} \quad (14)$$

$$r_d = 0,5 \quad \text{untuk } \geq 30 \text{ m} \quad (15)$$



Gambar 2. Faktor Reduksi tegangan dan Kedalaman

Sumber: Seed dan Idriss (1971)

Untuk mempermudah perhitungan, T. F. Blake (1996) memperkirakan kurva rata-rata yang diplot pada **Gambar 2** dengan rumus sebagai berikut:

$$r_d = \frac{(1,000 - 0,4113z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5})}{(1,000 - 0,4117z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,001210z^2)} \quad (16)$$

2. Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Ketahanan tanah dalam menghadapi likuifaksi, yang dikenal sebagai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR), ditentukan melalui parameter in-situ yang diperoleh dari hasil

pengujian lapangan berupa jumlah pukulan pada SPT. Penentuan tingkat keamanan suatu area dilakukan dengan membandingkan nilai CRR terhadap beban gempa yang direpresentasikan oleh *Cyclic Stress Ratio* (CSR). Kondisi tanah dikategorikan aman apabila kapasitas ketahanannya melampaui beban yang terjadi ($CRR > CSR$), sedangkan jika nilai CRR lebih kecil daripada CSR ($CRR < CSR$), maka tanah tersebut memiliki potensi tinggi untuk mengalami likuifaksi.

1.2.3.4 Faktor Keamanan dan Indeks Potensi Likuifaksi

Untuk *Safety Factor* terhadap likuifaksi dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$SF = \frac{CRR}{CSR} \quad (17)$$

dimana:

jika $SF < 1$ maka terjadi likuifaksi;

jika $SF = 1$ maka kondisi kritis akan likuifaksi;

jika $SF > 1$ maka tidak terjadi likuifaksi (aman).

Potensi Kerusakan atau yang lebih dikenal *Liquefaction Potential Index* (LPI) merupakan parameter yang digunakan dalam mengevaluasi potensi likuifaksi dengan menghitung nilai LPI, dimana mengintergrasikan faktor keamanan (SF) pada kedalaman 0-20 m. Iwasaki et. al (1981) mengembangkan metode LPI karena mengasumsikan bahwa kegagalan likuifaksi sebanding dengan ketebalan lapisan, jarak antara tanah yang terlikuifaksi dan permukaan, serta faktor keamanan pada rumus sebagai berikut:

$$LPI = \int_0^{20} F(z) w(z) dz \quad (18)$$

dimana:

z = kedalaman lapisan pasir (0-20 m)

$F(z)$ = faktor keamanan pada tanah yang likuifaksi

$w(z)$ = faktor beban yang dipengaruhi kedalaman

Beberapa faktor yang menjadi syarat untuk menentukan besarnya faktor beban dan faktor keamanan pada kedalaman 0-20m. Faktor-faktor tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} F(z) &= 1 - SF && \text{Untuk } SF < 1 \\ F(z) &= 0 && \text{Untuk } SF \geq 1 \\ w(z) &= 10 - 0,5z && \text{Untuk } z < 20m \\ w(z) &= 0 && \text{Untuk } z \geq 20m \end{aligned}$$

Nilai LPI dapat disesuaikan dengan **Tabel 7** untuk menentukan kerusakan tanah akibat likuifaksi sebagai berikut:

Tabel 7. Nilai Kekuatan Tanah Berdasarkan *Liquefaction Potential Index* (LPI)

LPI	Iwasaki et al. (1982)	Luna dan Frost (1998)	Management of Earthquake Risk and Mitigation (MERM) (2003)
LPI = 0	<i>Very Low</i>	<i>Little</i>	<i>None</i>

$0 < LPI < 5$	<i>Low</i>	<i>Minor</i>	<i>Low</i>
$5 < LPI < 15$	<i>High</i>	<i>Moderate</i>	<i>Medium</i>
$15 > LPI$	<i>Very High</i>	<i>Major</i>	<i>High</i>

Sumber: *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 2012

1.2.4 Fuzzy Logic

Logika fuzzy (*Fuzzy Logic*) merupakan logika yang berhadapan langsung dengan konsep kebenaran sebagian, bahwa logika klasik dalam segala hal dapat mengekspresikan dengan 0 atau 1 sementara logika fuzzy dimungkinkan adanya nilai antara 0 sampai dengan 1, serta menjadi suatu cara tepat untuk memetakan ruang *input* ke dalam ruang *output* (Kusumadewi, 2003). Gagasan mengenai sistem ini pertama kali dipresentasikan dan disebarluaskan oleh Lotfi A. Zadeh, yang merupakan seorang guru besar di University of California, Berkeley, pada tahun 1965. Dalam praktiknya, logika fuzzy memanfaatkan terminologi atau ungkapan linguistik untuk merepresentasikan nilai dari suatu variabel. Mekanisme kerja sistem ini berlandaskan pada konsep derajat keanggotaan suatu nilai, yang mana derajat tersebut menjadi acuan dalam menetapkan hasil akhir sesuai dengan parameter atau spesifikasi yang telah ditetapkan sebelumnya. Sebagaimana prinsip dasarnya, fokus utama dari logika fuzzy adalah proses pemetaan dari domain input menuju domain output yang diinginkan. Antara input dan output ada suatu kotak hitam yang harus memetakan input ke output yang sesuai. Alasan mengapa orang menggunakan logika fuzzy sebagai berikut (Kusumadewi, 2003):

1. Konsep logika *fuzzy* matematis yang mendasari penalaran *fuzzy* sangat sederhana dan mudah dimengerti.
2. Logika *fuzzy* sangat fleksibel.
3. Logika *fuzzy* memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat.
4. Logika *fuzzy* mampu memodelkan fungsi-fungsi yang sangat kompleks.
5. Logika *fuzzy* dapat membangun dan mengaplikasikan pengalaman-pengalaman para pakar secara tidak langsung tanpa harus melalui proses pelatihan.
6. Logika *fuzzy* dapat bekerjasama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional.
7. Logika *fuzzy* didasarkan pada bahasa alami.

Logika *fuzzy* di atas teori himpunan *fuzzy*, dimana derajat kebenaran suatu pernyataan diwakili oleh derajat keanggotaan suatu elemen dalam himpunan *fuzzy*.

Logika *fuzzy* memiliki dua metode dalam *Fuzzy Inference System* (FIS) yaitu metode Mamdani dan Sugeno, perbedaan dari kedua metode ini terletak pada *output* yang dihasilkan, proses komposisi aturan dan defuzzifikasinya. Pada metode Sugeno, *output* yang dihasilkan berupa fungsi linear atau konstanta. *Output* ini berbeda dengan yang dihasilkan oleh metode Mamdani, metode ini menghasilkan *output* berupa suatu nilai pada domain *fuzzy* yang dikategorikan ke dalam komponen linguistik. Kelemahan dari *output* berupa fungsi linear atau konstanta adalah nilai output yang dihasilkan harus sesuai dengan kriteria yang telah ditentukan oleh anteseden (penyebab). Oleh karena itu, metode *fuzzy* Mamdani lebih akurat dalam menghasilkan suatu *output* berupa himpunan *fuzzy* (Salman, 2010).

1.2.4.1 Himpunan Fuzzy dan Fungsi Keanggotaan

Pada himpunan tegas (crisp), setiap elemen x di dalam semesta pembicaraan X hanya memiliki dua kemungkinan, yaitu menjadi anggota himpunan A dengan nilai 1 atau bukan anggota A dengan nilai 0 yang direpresentasikan oleh fungsi karakteristik $\chi_A(x)$ (Ross, 2010). Setiap elemen $x \in X$ dipetakan ke interval melalui fungsi keanggotaan $f_A(x)$ (Zadeh, 1965).

Secara matematis, suatu himpunan fuzzy A pada semesta pembicaraan X dicirikan sebagai berikut: $\mu_A = X \rightarrow [0,1]$ dimana, $\mu_A(x)$ merupakan derajat keanggotaan (x) terhadap himpunan fuzzy A . Definisi tersebut memberikan makna bahwa nilai $\mu_A(x)$ yang mendekati 1 menunjukkan bahwa x sangat merepresentasikan konsep yang dimodelkan, sedangkan nilai yang mendekati 0 menunjukkan sebaliknya.

Himpunan Fuzzy didasarkan pada gagasan untuk memperluas jangkauan fungsi karakteristik sedemikian hingga fungsi tersebut akan mencakup bilangan real pada interval $[0,1]$. Nilai keanggotaannya menunjukkan bahwa suatu item dalam semesta pembicaraan tidak hanya berada pada 0 atau 1, namun juga nilai yang terletak diantaranya. Dengan kata lain, nilai kebenaran suatu item tidak hanya benar atau salah. Nilai 0 menunjukkan salah, nilai 1 menunjukkan benar, dan masih ada nilai-nilai yang terletak antara benar dan salah. Himpunan fuzzy memiliki 2 atribut sebagai berikut:

1. Linguistik, yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi dengan menggunakan bahasa alami.
2. Numeris, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel.

Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem fuzzy sebagai berikut:

1. Variabel *Fuzzy*, merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*.
2. Himpunan *Fuzzy*, merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu variabel.
3. Semesta Pembicaraan, adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel *fuzzy*. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Adakalanya nilai semesta pembicaraan ini tidak dibatasi batas atasnya.
4. Domain Himpunan *Fuzzy*, adalah keseluruhan nilai yang diijinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan fuzzy. Seperti halnya semesta pembicaraan, domain merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai domain dapat berupa bilangan positif maupun negatif.

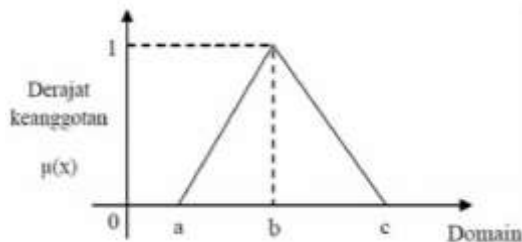
Fungsi keanggotaan (membership function) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. Ada beberapa fungsi yang bisa digunakan sebagai berikut:

1. Fungsi Segitiga

Fungsi keanggotaan segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis linier yang ditandai oleh adanya 3 parameter (a, b, c) yang akan menentukan koordinat x dari 3 sudut.

Fungsi Keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{(b-a)}{(x-a)}; & a \leq x \leq b \\ \frac{(b-x)}{(c-b)}; & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (19)$$



Gambar 3. Kurva Fungsi Keanggotaan Bentuk Segitiga

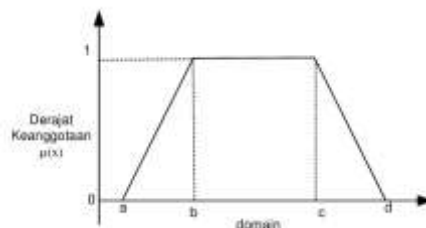
Sumber: Kusumadewi, S., dan Guswaludin, I. (2005)

2. Fungsi Trapesium

Fungsi keanggotaan trapesium pada dasarnya seperti kurva fungsi keanggotaan segitiga, namun beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan 1 yang ditandai oleh adanya 4 parameter (a, b, c, d).

Fungsi Keanggotaan:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq d \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}; & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)}{(d-c)}, & x \geq c \end{cases} \quad (20)$$



Gambar 4. Kurva Fungsi Keanggotaan Bentuk Trapesium

Sumber: Kusumadewi, S., dan Guswaludin, I. (2005)

Secara grafis, sumbu horizontal (sumbu x) mewakili variabel penelitian yang mencakup nilai semesta pembicaraan dan domain. Himpunan fuzzy dipetakan diatas sumbu ini melalui fungsi keanggotaan yang membentuk kurva tertentu. Sementara itu, sumbu vertikal (sumbu y) menunjukkan derajat keanggotaan (μ) dalam rentang $[0,1]$ yang merepresentasikan tingkat kebenaran suatu nilai.

1.2.4.2 Aturan Fuzzy (Rule Base)

Dalam pembentukan aturan *fuzzy*, cara paling umum untuk merepresentasikan pengetahuan manusia adalah dengan membentuk ekspresi bahasa alami tipe *IF-THEN*. Bentuk ini disebut deduktif dan merupakan pengetahuan dangkal yang mengekspresikan pengetahuan empiris serta pengalaman praktis manusia dalam bahasa komunikasi. Namun, sistem ini tidak menangkap pengetahuan yang lebih dalam seperti intuisi dan perilaku objek yang bersifat induktif. Sistem berbasis aturan *fuzzy* sangat berguna untuk memodelkan sistem kompleks yang diamati manusia karena menggunakan variabel linguistik sebagai syarat dan kesimpulan yang direpresentasikan oleh himpunan *fuzzy* (Ross, 2005). Mamdani dan Assilian (1975) menunjukkan bahwa sekumpulan aturan linguistik *IF-THEN* yang disusun berdasarkan pengalaman operator dapat membentuk *fuzzy logic controller* dengan kinerja yang kompetitif dibandingkan pengendali konvensional.

Tabel 8. Bentuk kanonik untuk sistem berbasis aturan *fuzzy*.

Aturan 1:	<i>IF</i> kondisi C^1 , <i>THEN</i> batasan C^1
Aturan 2:	<i>IF</i> kondisi C^2 , <i>THEN</i> batasan C^2
Aturan r :	<i>IF</i> kondisi C^r , <i>THEN</i> batasan C^r

Sumber: Ross, 2010

Aturan-aturan ini didasarkan pada representasi bahasa alami dan model, yang sendiri didasarkan pada himpunan fuzzy dan logika fuzzy. Tingkat pemahaman dan deskripsi sistem kompleks yang kabur diungkapkan dalam bentuk serangkaian batasan pada output berdasarkan kondisi input tertentu (**Tabel 8**). Batasan umumnya dimodelkan oleh himpunan dan relasi fuzzy. Pernyataan batasan ini biasanya dihubungkan oleh penghubung linguistik seperti "dan," "atau," atau "lainnya." Batasan $R_1, R_2, \dots, R_r$ berlaku untuk tindakan output, atau konsekuensi dari aturan. Hal tersebut mengilustrasikan beberapa teknik yang paling umum (Ross, 1995) untuk dekomposisi aturan linguistik yang melibatkan banyak anteseden ke dalam bentuk kanonik sederhana yang diilustrasikan dalam **Tabel 8** (Ross, 2010).

Seperti halnya himpunan konvensional, ada beberapa operasi yang didefinisikan secara khusus untuk mengkombinasi dan memodifikasi himpunan fuzzy. Nilai keanggotaan sebagai hasil dari operasi 2 himpunan sering dikenal dengan nama fire strength atau α -predikat. Ada 3 operator dasar yang diciptakan oleh Zadeh, yaitu:

1. Interseksi

Operator ini berhubungan dengan operasi interseksi pada himpunan. α –predikat sebagai hasil operasi dengan operator AND diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil antar elemen pada himpunan yang bersangkutan. Selanjutnya nilai α –predikat digunakan dalam fungsi implikasi

untuk memotong fungsi keanggotaan pada bagian kosekuen (*output*), sehingga menghasilkan daerah *fuzzy* baru untuk setiap aturan.

$$\mu_{A \cap B} = \min [\mu_A[x], \mu_B[y]] \quad (21)$$

2. Union

Operator ini berhubungan dengan operasi union pada himpunan. α –predikat sebagai hasil operasi dengan operator OR diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terbesar antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan. Dalam sistem inferensi, operator union juga digunakan pada tahap agregasi untuk menggabungkan seluruh daerah *fuzzy* hasil implikasi dari tiap-tiap aturan menjadi satu kesatuan himpunan *fuzzy* tunggal.

$$\mu_{A \cup B} = \max [\mu_A[x], \mu_B[y]] \quad (22)$$

3. Komplemen

Operator ini berhubungan dengan operasi komplemen pada himpunan. α –predikat sebagai hasil operasi dengan operator NOT diperoleh dengan mengurangkan nilai keanggotaan elemen pada himpunan yang bersangkutan dari 1.

$$\mu_{A'} = 1 - \mu_A[x] \quad (23)$$

1.2.4.3 Fuzzy Inference System dan Defuzzifikasi

Sistem inferensi *fuzzy* (*Fuzzy Inference System* atau FIS) merupakan sebuah metodologi presisi yang digunakan untuk mentransformasikan sekumpulan data input menjadi hasil output tertentu yaitu berupa kerangka penalaran matematis yang dibangun di atas teori himpunan fuzzy. Dalam teori ini, keanggotaan suatu elemen terhadap himpunan tidak lagi bersifat biner 0 atau 1, tetapi dinyatakan sebagai derajat keanggotaan kontinu antara 0 hingga 1 sehingga konsep-konsep yang samar seperti “rendah”, “sedang”, dan “tinggi” dapat direpresentasikan secara lebih realistis.



Gambar 5. Blok Diagram FIS

Sumber: Shapiro dan Koissi (2015)

Saat membangun sistem yang berbasis pada aturan fuzzy maka akan digunakan variabel linguistik yang merupakan suatu interval numerik yang mempunyai nilai linguistik, yang semantiknya didefinisikan oleh fungsi keanggotaan. Tiga komponen utama berbasis aturan fuzzy sebagai berikut:

1. Fuzzifikasi (*Fuzzification*)

Fuzzification berfungsi mengubah masukan nilai kebenarannya bersifat pasti (*crisp input*) ke dalam bentuk *fuzzy input*, yang berupa nilai linguistik yang semantiknya ditentukan berdasarkan fungsi keanggotaan tertentu.

2. Mesin Inferensi (*Inference Engine*)

Inference melakukan penalaran menggunakan *fuzzy input* dan *fuzzy rules* yang telah ditentukan sehingga menghasilkan *fuzzy output*. Proses *inference* memperhitungkan semua aturan yang ada dalam basis pengetahuan. Hasil dari proses *inference* dipresentasikan oleh suatu himpunan *fuzzy* (*fuzzy set*) untuk setiap variabel bebas pada *consequent*. Menurut Siswoyo dan Zaenal (2011), dalam FIS terdapat dua proses utama pada tahap ini, yaitu:

- Implikasi, yaitu proses mendapatkan *consequent* keluaran sebuah *IF-THEN rule* berdasarkan derajat kebenaran *antecedent*. Namun sebuah *rule* dapat dibobot dengan bilangan antara 0 sampai 1 umumnya *rule* diberi bobot 1. Setelah setiap *rule* diberi bobot proses implikasi baru bisa dilakukan. Implikasi dilakukan pada setiap *rule*, masukan dari setiap proses implikasi adalah derajat kebenaran bagian *antecedent* dan *fuzzy set* pada bagian *consequent*. Dua fungsi yang digunakan dalam proses implikasi adalah min dan prod (*product*, menskalakan *fuzzy set* keluaran).
- Agregasi, yaitu proses mengkombinasikan keluaran semua *IF-THEN rule* menjadi sebuah *fuzzy set* tunggal. Jika bagian *consequent* terdiri lebih dari satu pernyataan maka proses agregasi dilakukan secara terpisah untuk tiap variabel *IF-THEN rule*. Selanjutnya, pada hasil agregasi akan dilakukan defuzzifikasi untuk mendapatkan nilai *crisp* sebagai *output* sistem.

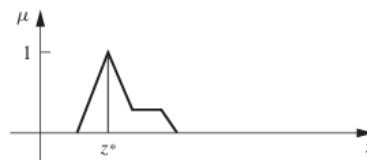
3. Defuzzifikasi (*Defuzzification*)

Defuzzification atau penegasan fungsi untuk mengubah *fuzzy output* menjadi *crisp value* berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Menurut Ross (2010), terdapat 4 metode dalam defuzzifikasi, sebagai berikut:

- Prinsip keanggotaan maksimum (*Max membership principle*)
Skema ini, yang juga diidentifikasi sebagai metode ketinggian, dikhususkan untuk fungsi keluaran yang memiliki titik puncak tunggal. Secara matematis, metode ini dirumuskan melalui ekspresi aljabar berikut:

$$\mu_c(z^*) \geq \mu_c(z) \quad \text{untuk semua } z \in Z \quad (24)$$

dimana z^* adalah nilai yang didefuzzifikasi, dan ditunjukkan secara grafis pada **Gambar 6**.



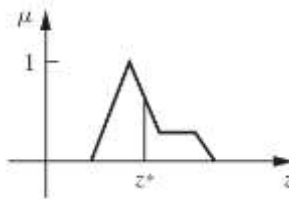
Gambar 6. Metode defuzzifikasi keanggotaan maksimum
Sumber: Ross (2010)

b. Metode *Centroid* (*Centroid method*)

Metode defuzzifikasi yang paling populer dan memiliki dasar fisik yang kuat adalah prosedur ini, yang sering disebut sebagai pusat area atau pusat gravitasi (Sugeno, 1985; Lee, 1990). Secara matematis, metodenya dinyatakan dalam ekspresi aljabar berikut:

$$z^* = \frac{\int \mu c(z) \cdot z \, dz}{\int \mu c(z) \, dz} \quad (25)$$

dimana $\int$ menunjukkan integrasi aljabar. Metode ini ditunjukkan pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Metode defuzzifikasi *centroid*
Sumber: Ross (2010)

c. Metode rata-rata tertimbang (*Weighted average method*)

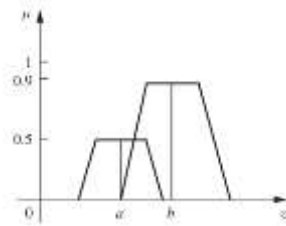
Metode rata-rata tertimbang adalah metode yang paling sering digunakan dalam aplikasi fuzzy karena merupakan salah satu metode yang lebih efisien secara komputasi. Meski demikian, penggunaan metode ini umumnya hanya terbatas pada fungsi keanggotaan keluaran yang bersifat simetris. Secara aljabar, metodenya dirumuskan sebagai berikut:

$$z^* = \frac{\sum \mu c(\bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum \mu c(\bar{z})} \quad (26)$$

dimana Σ menunjukkan jumlah aljabar dan di mana z adalah *centroid* dari setiap fungsi keanggotaan simetris. Metode ini ditunjukkan pada Gambar 8. Metode ini dibentuk dengan memberi bobot pada setiap fungsi keanggotaan dalam *output* berdasarkan nilai keanggotaan maksimum masing-masing. Sebagai contoh, kedua fungsi yang ditunjukkan pada **Gambar 8** akan menghasilkan bentuk umum berikut untuk nilai yang didefuzzifikasi.

$$z^* = \frac{a(0,5) + b(0,9)}{0,5 + 0,9} \quad (27)$$

Karena metode ini dapat dibatasi pada fungsi keanggotaan simetris, nilai a dan b adalah rata-rata (*sentroid*) dari bentuk masing-masing. Metode ini terkadang diterapkan pada fungsi tidak simetris dan berbagai keluaran skalar (Sugeno, 1985).

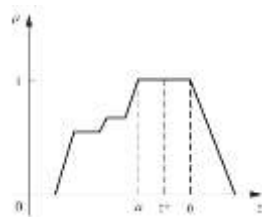


Gambar 8. Metode defuzzifikasi rata-rata tertimbang
Sumber: Ross (2010)

- d. Keanggotaan maksimum rata-rata (*Mean max membership*)
Metode ini sering disebut *middle of maxima* sangat identik dengan metode sebelumnya, namun mengakomodasi nilai keanggotaan maksimum yang tidak tunggal atau berupa rentang nilai tertentu (*plateau*). Secara matematis, metodenya dinyatakan sebagai (Sugeno, 1985; Lee, 1990):

$$z^* = \frac{a + b}{2} \quad (28)$$

dimana a dan b didefinisikan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Metode rata-rata tertimbang untuk defuzzifikasi
Sumber: Ross (2010)

1.2.5 Penelitian Terdahulu

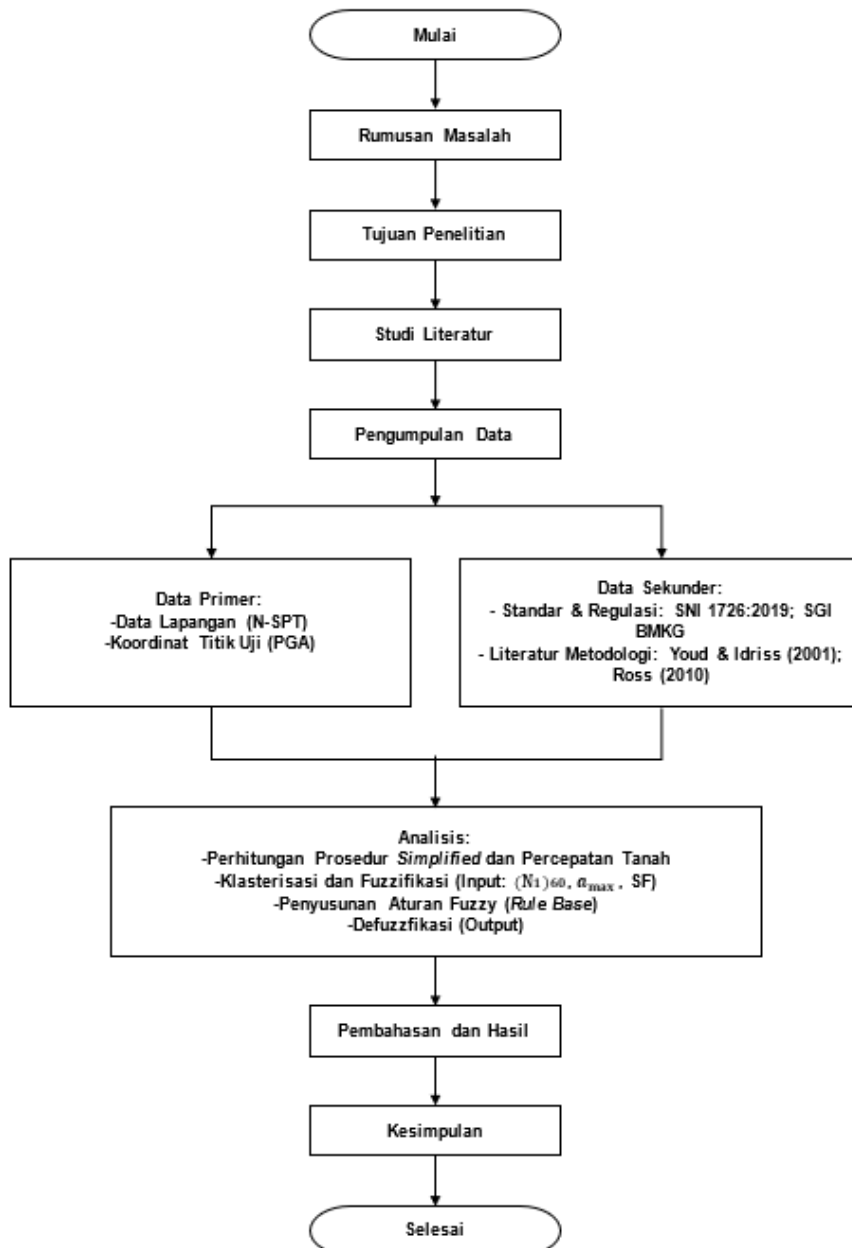
Tabel 9. State of The Art

No	Judul Penelitian	Tahun	Tujuan Penelitian	Varibel Penelitian	Hasil Penelitian
1	Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils (Youd & Idriss)	2001	Merangkum konsensus pakar untuk memperbarui " <i>simplified procedure</i> " Seed & Idriss dalam mengevaluasi ketahanan likuifaksi berdasarkan data SPT serta parameter PGA_M atau a_{max}	CSR, CRR , N_{160} , PGA_M atau a_{max} , r_d , MSF	Mengembangkan kurva $CRR-N_{160}$ untuk evaluasi likuifaksi berdasarkan SPT yang menjadi standar praktik geoteknik
2	Fuzzy Multi-Criteria Decision Making (Kusumadewi & Guswaludin)	2005	Mengembangkan metode fuzzy multi-criteria decision making untuk mengintegrasikan beberapa parameter keputusan menjadi satu indeks potensi tunggal menggunakan fungsi keanggotaan segitiga	Bobot kriteria, rating kecocokan, fungsi segitiga	Mengembangkan metode FMCDM untuk mengintegrasikan multiple parameter menjadi satu indeks keputusan tunggal
3	Fuzzy Logic with Engineering Applications (Ross)	2010	Menyajikan landasan aplikasi <i>fuzzy logic</i> untuk analisis data rekayasa yang mengandung ketidakpastian tinggi menggunakan himpunan fuzzy dan inferensi fuzzy	Himpunan fuzzy, fungsi keanggotaan, inferensi, defuzzifikasi	Menyediakan metodologi <i>fuzzy logic</i> untuk pengolahan data rekayasa dengan ketidakpastian tinggi
4	An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller (Mamdani & Assilian)	1975	Mengembangkan sistem inferensi fuzzy berbasis aturan linguistik IF-THEN untuk memetakan parameter <i>input</i> multiple menjadi <i>output</i> potensi tunggal	<i>Input</i> Fuzzy, aturan IF-THEN, inferensi Mamdani	Menghasilkan metode inferensi fuzzy Mamdani untuk memetakan <i>input</i> multiple ke <i>output</i> tunggal.

5	Fuzzy Sets (Zadeh)	1965	Memperkenalkan konsep himpunan fuzzy dengan fungsi keanggotaan kontinu untuk merepresentasikan ketidakpastian parameter	Fungsi keanggotaan $\mu_A(x)$, operasi union/intersection/complement, relasi fuzzy	Landasan matematis <i>fuzzy logic</i> untuk merepresentasikan ketidakpastian parameter teknik.
---	-----------------------	------	---	---	--

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bagan Aliran Penelitian



Gambar 10. Diagram Alir Penelitian

2.2 Strategi Penelitian

Desain penelitian didefinisikan sebagai skema prosedural yang mengintegrasikan pandangan dunia filosofis dengan metode teknis pengumpulan serta analisis data. Inti dari kerangka ini adalah strategi penyelidikan (*strategies of inquiry*) yang berfungsi sebagai panduan operasional dalam menerapkan pendekatan kuantitatif, kualitatif, maupun metode campuran. Pemilihan strategi tersebut berupa eksperimen, studi kasus, maupun survei yang disesuaikan secara spesifik berdasarkan kompleksitas masalah penenilitan dan pengalaman subjektif peneliti (Creswell, 2009).

Yin (2003) menyebutkan terdapat lima bentuk utama dari strategi penelitian yaitu studi kasus, eksperimen, survei, sejarah atau penelitian historis, dan analisis informasi arsip. Setiap strategi memiliki kekurangan dan kelebihan yang khas tergantung pada tiga kondisi: jenis pertanyaan penelitian, kendali yang dimiliki peneliti atas peristiwa perilaku aktual dan fokus pada fenomena kontemporer dibandingkan dengan fenomena historis.

Tabel 10. Strategi Penelitian

Strategi	Bentuk Pertanyaan Penelitian	Kontrol	Kontemporer
Eksperimen	Bagaimana, mengapa	Tidak	Ya
Survei	Siapa, apa, dimana, berapa banyak, berapa besar	Tidak	Ya
Analisa Arsip	Siapa, apa, dimana, berapa banyak, berapa besar	Tidak	Ya/ Tidak
Histori	Bagaimana, mengapa	Tidak	Tidak
Studi Kasus	Bagaimana, mengapa	Tidak	Ya

Penyusunan pertanyaan dalam penelitian ini akan disampaikan melalui beberapa bentuk pertanyaan penelitian (Research Question). Rumusan tersebut menjadi dasar dalam memilih instrumen penelitian yang sesuai. Strategi penelitian dalam kajian ini dijelaskan berdasarkan masing-masing rumusan masalah atau pertanyaan penelitian (RQ) sebagai berikut:

1. **Pertanyaan Penelitian 1 (RQ 1): Bagaimana hasil analisis risiko potensi likuifaksi *Liquefaction Potential Index* (LPI) dengan menggunakan metode *simplified*?**

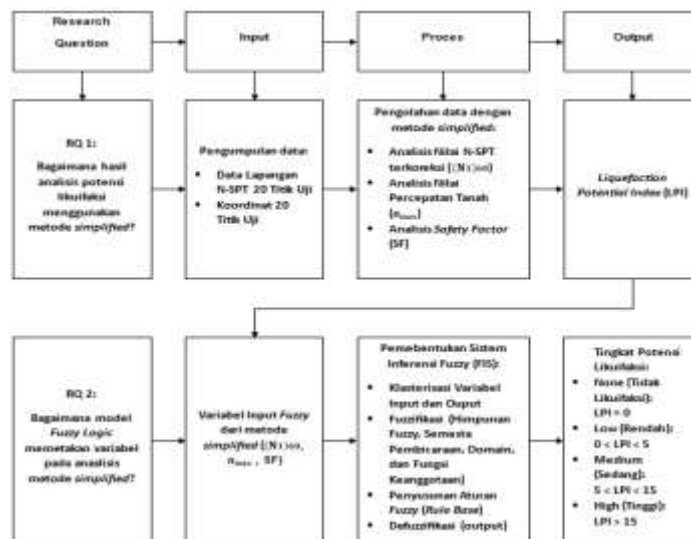
Strategi yang digunakan untuk menjawab pertanyaan pertama adalah melakukan analisis menggunakan metode *simplified* dari Youd dan Idriss (2001). Proses yang dimulai mengoreksi data lapangan N-SPT menjadi $(N1)_{60}$,

menentukan percepatan tanah ($a_{\max}$) melalui percepatan tanah puncak dan koefisien situs, serta menghitung nilai faktor keamanan (SF) dari nilai CSR dan CRR. Hasil akhirnya adalah nilai *Liquefaction Potential Index* (LPI) yang merepresentasikan potensi likuifaksi di setiap titik uji secara standar.

2. Pertanyaan Penelitian 2 (RQ 2): Bagaimana analisis tingkat risiko potensi likuifaksi dengan menggunakan analisis fuzzy logic?

Strategi yang digunakan untuk menjawab pertanyaan kedua adalah membangun sistem inferensi berbasis *Fuzzy Logic* dengan metode Mamdani. Model ini mengintegrasikan tiga variabel *input* ($(N1)_{60}$, $a_{\max}$, SF) melalui tahap *fuzzification* dengan melakukan klasterisasi masing-masing variabel dengan himpunan fuzzy, penentuan semesta pembicaraan (range), domain(params) dan fungsi keanggotaan; penyusunan rule base; hingga menghasilkan *output* (LPI) pada tahap *defuzzification* dengan tahapan klasterisasi yang sama seperti pada tahapan *fuzzification*. Hasilnya adalah Tingkat Risiko Potensi Likuifaksi dengan kategori “Tidak Likuifaksi (None)”, “Rendah (Low)”, “Sedang (Medium)”, dan “Tinggi (High)”.

2.3 Kerangka Penelitian



Gambar 11. Kerangka Penelitian

2.4 Data Penelitian

2.4.1 Jenis-Jenis Data

Dalam penelitian ini, data yang digunakan ada dua jenis yaitu:

1. Data Primer

Data primer merupakan sumber data yang didapatkan secara langsung dari subjek penelitian atau sumber aslinya. Dalam hal ini, peneliti berperan sebagai pengumpulan data tangan pertama yang melakukan pengambilan informasi

tanpa melalui perantara. Penelitian ini menggunakan data primer sebagai berikut:

- a. Data N-SPT lapangan 20 (dua puluh) titik uji.
 - b. Data Koordinat dan PGA 20 (dua puluh) titik uji.
2. Data Sekunder
- Data sekunder diklasifikasikan sebagai data yang diperoleh peneliti secara tidak langsung atau melalui media perantara. Data jenis ini umumnya telah dikumpulkan dan diolah oleh pihak lain sebelumnya, sehingga peneliti mengaksesnya dalam bentuk dokumen, laporan historis, arsip, atau melalui bantuan pihak ketiga. Penelitian ini menggunakan data sekunder yang menjadi acuan sebagai berikut:
- a. SNI 1726:2019 digunakan untuk menentukan nilai PGA_M atau a_{max}
 - b. BMKG sebagai acuan dalam proses klasterisasi variabel PGA_M atau a_{max} sebagai *input* dalam menggunakan metode *fuzzy*.
 - c. Youd dan Idriss (2001) sebagai prosedur perhitungan dengan menggunakan metode *simplified*, serta Terzaghi et al., (1996) dan MERM (2003) sebagai acuan proses klasterisasi variabel $(N1)_{60}$, SF, dan LPI.
 - d. Ross (2010) sebagai acuan dalam membangun sistem inferensi fuzzy dengan metode Mamdani yaitu dari proses klasterisasi, fuzzifikasi, aturan fuzzy, dan defuzzifikasi.

2.5 Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian pada dasarnya adalah suatu alat yang digunakan untuk mengukur fenomena alam maupun sosial yang diamati. Dalam penelitian kuantitatif, instrumen ini berfungsi sebagai alat pengumpul data yang digunakan untuk mengukur nilai variabel yang diteliti untuk menjawab rumusan masalah dan menguji hipotesis. Instrumen tersebut dapat berupa tes maupun non-tes seperti kuesioner, observasi, dan wawancara (Sugiyono, 2013).

Keandalan hasil penelitian sangat bergantung pada kualitas instrumen yang digunakan. Oleh karena itu, agar instrumen dapat dipercaya dan mampu menghasilkan data yang akurat, instrumen tersebut harus memenuhi kriteria validitas dan reliabilitas. Instrumen yang valid berarti alat ukur tersebut tepat untuk mendapatkan data apa yang seharusnya diukur, sedangkan instrumen reliabel akan menghasilkan data yang konsisten apabila digunakan beberapa kali untuk mengukur objek yang sama (Sugiyono, 2013).

Instrumen penelitian ini dilakukan dengan pengumpulan data lapangan berupa pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) dengan mendapatkan data N-SPT lapangan beserta dengan jenis tanah, lapisan kedalaman dari 20 (dua puluh) titik uji dan koordinat 20 (dua puluh) titik uji.

2.6 Populasi dan Sampel

Populasi dipahami sebagai wilayah generalisasi yang mencakup subjek maupun objek dengan kualitas dan karakteristik spesifik yang telah ditetapkan oleh peneliti untuk

dipelajari guna menarik sebuah kesimpulan. Merujuk pada pandangan Sugiyono (2013), hakikat populasi tidak hanya terbatas pada sekumpulan manusia (orang), melainkan juga mencakup benda-benda alam dan objek fisik lainnya. Lebih lanjut, populasi bukan sekadar representasi kuantitas atau jumlah elemen yang ada, melainkan meliputi seluruh atribut, sifat, dan karakteristik mendalam yang melekat pada objek atau subjek yang diteliti tersebut.

Sampel merupakan bagian kecil dari populasi yang mencerminkan jumlah serta karakteristik dari populasi induknya. Dalam praktiknya, penggunaan sampel menjadi langkah strategis apabila peneliti menghadapi populasi dengan cakupan yang sangat luas, di mana terdapat kendala teknis seperti keterbatasan anggaran, tenaga, serta waktu yang tidak memungkinkan untuk melakukan studi terhadap seluruh anggota populasi. Oleh karena itu, hasil analisis data yang diperoleh dari sampel dapat diberlakukan secara luas bagi populasi (generalisasi). Namun, untuk menjamin keabsahan generalisasi tersebut, peneliti harus memastikan bahwa sampel yang diambil benar-benar bersifat representatif atau mampu mewakili kondisi populasi yang sebenarnya (Sugiyono, 2013).

Populasi dalam penelitian ini adalah area lahan yang terletak di daerah Untia, Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Lokasi ini menjadi wilayah generalisasi untuk meninjau potensi likuifaksi berdasarkan data teknis yang tersedia. Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah hasil pengujian SPT berupa 20 (dua puluh) titik uji.



Gambar 12. Pemetaan lokasi titik uji

Sumber: *Google Earth*

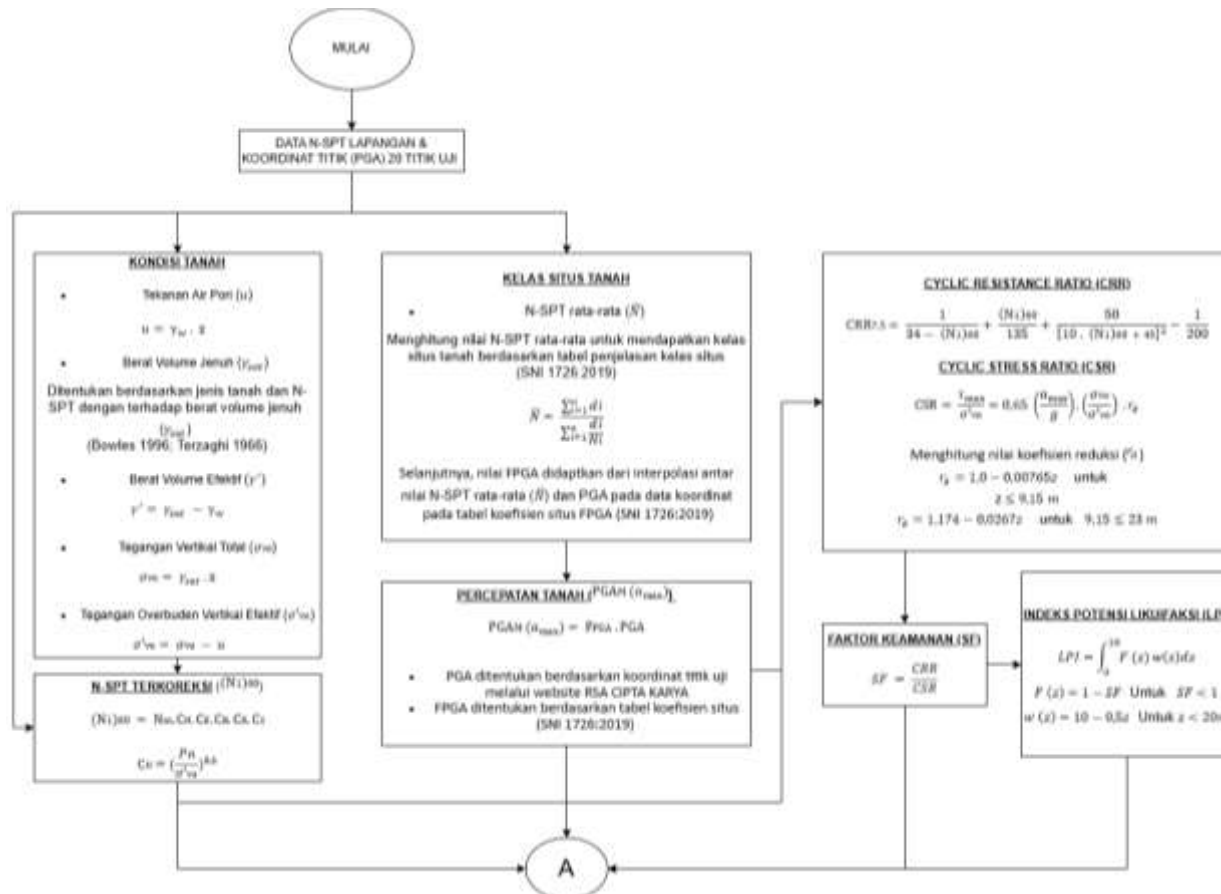
<https://earth.google/web>

2.7 Variabel Penelitian

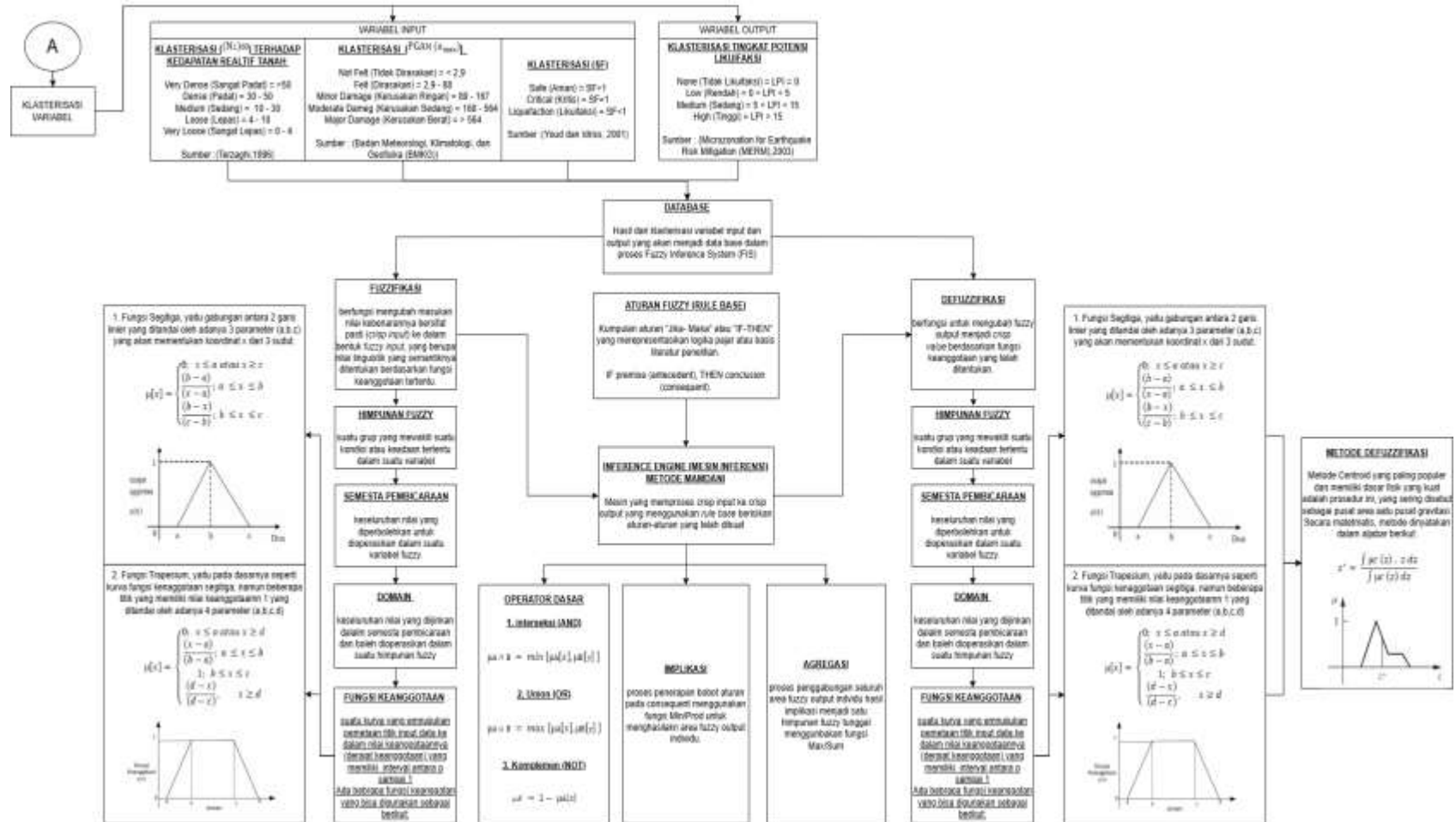
Sugiyono (2013) mendefinisikan variabel penelitian sebagai suatu atribut, sifat, atau nilai dari orang, objek, maupun kegiatan yang memiliki variasi tertentu yang ditetapkan oleh peneliti untuk dipelajari sehingga diperoleh informasi mengenai hal tersebut, yang kemudian ditarik kesimpulannya. Secara fundamental, variabel merupakan segala sesuatu yang berbentuk apa saja yang dipilih oleh peneliti untuk diamati secara ilmiah guna memahami fenomena yang sedang dikaji.

Pada penelitian ini variabel yang digunakan adalah N-SPT lapangan beserta dengan jenis tanah, lapisan kedalaman dari 20 (dua puluh) titik uji dan koordinat 20 (dua puluh) titik uji, dari variabel tersebut nantinya akan menghasilkan variabel $(N1)_{60}$, PGA_M atau (a_{max}) , *Safety Factor* (SF) sebagai input dan LPI sebagai output dalam metode fuzzy.

2.8 Analisis Data



Gambar 13. Kerangka Analisis Data RQ 1



Gambar 14. Kerangka Analisis Data RQ 2

Analisis data dilakukan untuk menjawab *Research Question* (RQ) 1 dengan prosedur pada **Gambar 13** sebagai berikut:

1. Data N-SPT Lapangan dan Koordinat Titik Uji
Tahapan ini merupakan pengumpulan data dari hasil pengujian lapangan yaitu *Standard Penetration Test* (SPT). Data yang diperoleh berupa kedalaman lapisan tanah (z), N-SPT, jenis tanah, serta koordinat titik uji yang akan menghasilkan nilai PGA ditentukan dari peta bahaya gempa Indonesia yang diperoleh dari *website* RSA Cipta Karya PUPR ([Desain Spektra Indonesia](#)).
2. Kondisi Tanah dan N-SPT terkoreksi ($(N1)_{60}$)
Parameter kondisi tanah dianalisis untuk menentukan tegangan *overburden* vertikal efektif (σ'_{vo}) yang diperoleh dari tegangan vertikal total (σ_{vo}), berat volume efektif (γ') dan jenuh (γ_{sat}), serta tekanan air pori (u). Setelah itu, nilai N-SPT lapangan dikoversi menjadi untuk menstandarisasi nilai penetrasi terhadap energi palu 60% (C_E), serta mempertimbangkan faktor koreksi alat (C_R, C_B, C_s) dan faktor koreksi N-SPT lapangan terhadap tekanan *overburden* efektif (C_N).
3. Kelas Situs Tanah dan Percepatan Tanah (PGA_M atau (a_{max}))
Penentuan kelas situs dilakukan berdasarkan nilai N-SPT rata-rata ($\bar{N}$) sesuai dengan standar SNI 1726:2019. Hasil klasifikasi situs ini digunakan untuk menentukan koefisien situs (F_{PGA}), kemudian dikalikan dengan nilai PGA untuk menghasilkan percepatan tanah (PGA_M atau (a_{max})) sebagai representasi beban gempa.
4. Tegangan Siklik Tanah (CRR dan CSR)
Tahapan ini membandingkan dua parameter utama yaitu *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) merepresentasikan ketahanan lapisan tanah terhadap likuifaksi berdasarkan nilai N-SPT yang telah terkoreksi dan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) merepresentasikan besarnya tegangan geser siklik yang iinduksi oleh gempa pada lapisan tanah menyebabkan likuifaksi.
5. Faktor Keamanan (SF)
Evaluasi potensi likuifaksi pada setiap lapisan tanah dilakukan dengan menghitung nilai faktor keamanan (*Safety Factor*) yang diperoleh dari perbandingan antara CRR dan CSR.
6. Indeks Potensi Likuifaksi (LPI)
Indeks potensi likuifaksi (*Liquefaction Potential Index*) digunakan untuk menilai kerentanan likuifaksi secara kumulatif pada satu titik bor hingga kedalaman 20 m dengan mengintegrasikan nilai SF lapisan tanah dengan faktor bobot kedalaman (z).

Analisis data dilakukan untuk menjawab *Research Question* (RQ) 2 dengan prosedur pada **Gambar 14** sebagai berikut:

1. Klasterisasi Variabel *Input* dan *Ouput*
Tahapan ini merupakan batasan nilai untuk setiap variabel berdasarkan referensi sebagai berikut:
 - a. Variabel *input* terdiri dari nilai N-SPT terkoreksi terhadap kepadatan relatif (Terzaghi, 1996), nilai PGA_M atau (a_{max}) untuk intensitas guncangan gempa (BMKG), dan nilai faktor keamanan (SF) (Youd dan Idriss, 2001).

- b. Variabel *output* menentukan klasifikasi tingkat potensi likuifaksi (LPI) yang terbagi menjadi kategori *None*, *Low*, *Medium*, dan *High* berdasarkan kriteria *Mitigation for Earthquake Risk Mitigation* (MERM, 2003).
2. Fuzzifikasi

Pada tahap ini, nilai masukan yang bersifat tegas (*crisp input*) dikonversi menjadi himpunan *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan. Penelitian ini menerapkan fungsi keanggotaan segitiga (*Triangular*) dan trapesium (*Trapezoidal*) untuk memetakan derajat keanggotaan setiap variabel dalam semesta pembicaraan dan domain yang telah ditentukan.
3. Aturan Fuzzy (*Rule Base*) dan *Database*

Seluruh logika pengetahuan sistem disimpan dalam *database* yang berisi kumpulan aturan “Jika-Maka” (IF-THEN). Aturan ini merepresentasikan hubungan kausalitas antara parameter gempa yang disusun berdasarkan literatur dan logika untuk menentukan tingkat potensi likuifaksi.
4. *Inference Engine* Metode Mamdani

Tahapan ini merupakan inti dari sistem *Fuzzy Inference System* (FIS) yang memproses masukan *fuzzy* berdasarkan aturan yang telah dibuat. Proses inferensi dilakukan melalui beberapa langkah sebagai berikut:

 - a. Operator dasar yaitu menggunakan operasi logika interseksi (*AND*) atau union (*OR*).
 - b. Implikasi yaitu penerapan bobot aturan pada bagian konsekuen menggunakan fungsi Min atau Prod.
 - c. Agregasi yaitu penggabungan seluruh area *fuzzy output* dari setiap aturan menjadi satu himpunan *fuzzy tunggal* menggunakan fungsi Max atau Sum.
5. Defuzzifikasi

Tahapan akhir adalah mengkonversi kembali hasil agregasi *fuzzy* menjadi nilai tegas (*risp value*). Metode yang digunakan adalah metode *centroid*, menghasilkan nilai *output* akhir dihitung dengan menentukan titik pusat area dibawah kurva fungsi keanggotaan hasil penggabungan. Nilai ini yang kemudian menjadi representatif kuantitatif dari tingkat potensi likuifaksi.